

テニスストリングスによるボールスピンのかかり具合の評価*

鮑力民^{*1}, 桜井正幸^{*1}, 中沢賢^{*1}

Evaluation of the Strings' Ability to Make the Tennis Ball Spin

Limin BAO^{*2}, Masayuki SAKURAI and Masaru NAKAZAWA^{*2} Faculty of Textile Science and Technology, Shinshu University,
3-15-1 Tokida, Ueda-shi, Nagano, 386-8567 Japan

When players control a ball in tennis, spin of ball is one of important factors. There are two kinds of strings for rackets. One is easy to make the ball spin, and the other is hard to do it. The relationship between spin behavior of the tennis ball and mechanical properties of strings was discussed. The rotations of ball after impact are observed by using high-speed photograph. It was found that the rotational speed of the ball became fast with the impact speed, and was dependent greatly on the kind of strings. The frictional characteristic between strings and ball was measured with a developed measurement apparatus. The low impact speed, a good correlation was found between the static coefficient of friction of strings and spin of ball. Spinning behaviors is predicted from measurements of coefficient of friction for strings. Tendency of measured frictional characteristic agrees with sensitivity evaluation of user.

Key Words: Tennis Racket, Spin, Strings, Tension, Frictional Characteristic, Sports Engineering, Evaluation

1. 緒言

テニスをプレイする際、インパクト後の打球の行方—コントロール性—を支配する大きな要因はラケットに張られたストリングとボールの反発特性とともにボールのスピンの特性といわれている⁽¹⁾。

現在ラケットとボールの衝突解析はFEMなどを用いて行われており、有効な結果が得られている⁽²⁾⁻⁽⁵⁾。

著者らはこれまで、繊維集合体を利用したテニスストリングスなどの反発性能に注目して、特別に作製したストリングスの直径方向における衝撃反撥特性測定装置を用い、多種類のストリングスについて測定を行い、その結果から衝撃反撥モデルを提案した。その衝撃反撥モデルによる解析評価はメーカーの反撥、振動吸収性の感性評価とかなり高い相関性があることがわかった⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

神田⁽⁸⁾⁽⁹⁾はボールのスピンを考慮できるボール・ラケット系の衝突モデルを提案し、FEMによる衝突解析をした。その結果は、ラケットの最適設計に一定な有用性を示している。しかし、ストリングスとボール

の摩擦力の影響が無視されている。

中川⁽¹⁰⁾はボールのスピンのかかり具合を高速カメラで測定した。ボールのスピンのかかり具合はボールの衝突速度に左右されると指摘している。

ボールのスピンのかかり具合は、ラケットが大きな要因の一つであるが、ストリングスも大きく関与していると考えられる。しかしストリングスとスピンの関係についての研究はまだ見当たらない。

各メーカーから高スピン性能のストリングスが出されているが、その客観的評価は容易ではなく、プレーヤーの感性に委ねられることが多い。

本研究では、ストリングスによるスピンのかかり具合を解明するために、テニスラケットの代用となる装置を作り、そこにボールを衝突させ、反発する際のボールのスピンのようすを高速カメラで撮影し、ストリングスによるスピンのかかり具合を測定する。また、ストリングスの表面摩擦を測定できる装置を考案し、ストリングスの摩擦特性とスピンのかかり具合の関係を検討し、感性評価の結果と比較する。

2. 実験方法と試料

2.1 ストリングスの摩擦特性の測定 ストリングスとテニスボールの摩擦特性はスピンのかかり具合との関連

* 原稿受付 2002年5月1日。

^{*1} 正員, 信州大学繊維学部(☎386-8567 上田市常田3-15-1).
E-mail: baolimi@giptc.Shinshu-u.ac.jp

を調べるためにストリングスにおける摩擦特性を測定する。

市販のストリングスとテニスボールに注目して、図1のような測定装置を作製した。ストリングスをテーブルに巻きつけ、テンションブロックの左右移動によって、一定な張力をかける(23 N)。このテーブルは移動台とねじで固定されるので、いくつかストリングスを巻いたテーブルを用意すれば、サンプルの交換は速やかに行われ、便利である。摩擦子は金属のおもりとその表面に接着したボールの一部分である。市販のテニスボールより切り取ったボール材を平らになるように一定な圧力をかけて、接着剤により金属のおもりと接着する。ストリングスとボール材との接触摩擦になる。ボール材は実験しているストリングスごとに交換するので、やや不便であるが、テスト前に、いくつか用意すれば、実験の効率が上がる。摩擦子の接触面積は40×26 mmである。ストリングスとボール材との摩擦におけるコンタクト圧力の変化は、おもりの増減により行う。速度可変なりニアモータによって、テーブルを移動させる。テーブルの移動速度はISOプラスチックシートの摩擦係数試験方法を参考にして、200 mm/minを採用した。

ストリングスとボール材の摩擦特性を測定する際、摩擦力を測定するセンサの応答性と測定システムの安定性を考慮して摩擦子と力センサの間にスプリング(K)を入れた。ばね定数Kの大きさの選定もISOプラスチックシートの摩擦係数試験方法を参考にした。摩擦力センサは片持ちはりのリン青銅板にひずみゲージをはり、センサインターフェースボード(PCD-100 A 共和電業)を利用して、その応答ひずみを測定し、パソコンに読取る。センサシステムの応答周波数は182.8 Hzである。

2.2 ストリングスのスピン具合の測定 ボールとストリングスの衝突前後におけるボールのスピン具合を測定するために、図2に示すシステムを用いた。

ラケットに張られたテニスのストリングスは、時間がたつとテンションがだんだん小さくなる。毎回同じテンション条件と、テンションを調節しやすくするために、ストリングスの固定装置を作製した。その装置は、300×300 mmの枠に、ストリングスを12 mm間隔ではり、マイクロメータで枠をスライドさせることにより、ストリングスのテンションを連続的に調整できるようにしてある。テンションは枠にはっているひずみゲージにより測定する。

ボールが一定な高さより自由落下し、ストリングス面に衝突し、はね返る。衝突の瞬間をストリングス面

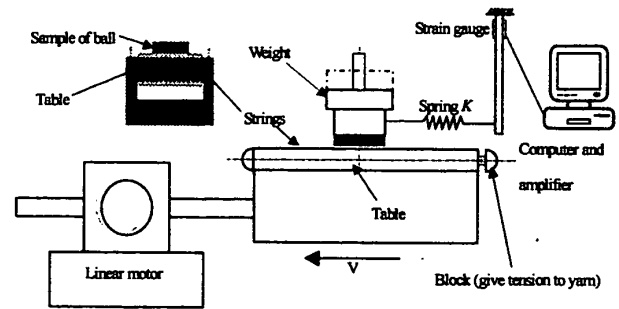


Fig. 1 Experimental Apparatus for measuring friction between strings and ball

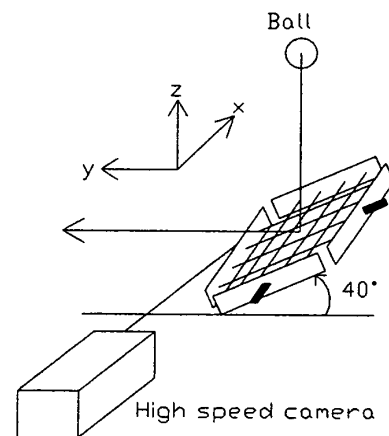


Fig. 2 Experimental system

に平行に真横から高速度カメラ(PHOTRONのFASTCAM-Rabit-mini 2)で撮影する。撮影速度は1200コマ/秒である。高速度カメラのメモリに保存したデータをパソコンに出力し、ディスプレイの画面上でボールにおける任意の点の座標をとり、ボールの回転数を算出する。同じ条件で5回実験を行い、その平均をとる。

ストリングス固定装置を中川⁽¹⁰⁾の実験を参考にして水平面から40°に固定する。

衝突後の回転数の計算についても、中川の方法⁽¹⁰⁾を参考にした。

図3に示すように、高速度写真の画面上において、時刻 t_1 から t_2 の変化により、ボール上の任意の2点 P_1, Q_1 は P_2, Q_2 へ移動する：

$$P_1(x_1, y_1) \rightarrow P_2(x_2, y_2) \quad Q_1(u_1, v_1) \rightarrow Q_2(u_2, v_2)$$

ただしボールがストリングス面から離れた後、回転速度一定とする。

角 P_1OP_2 を画面に垂直に2等分し、 O を含む平面と角 Q_1OQ_2 を垂直に2等分し O を含む平面の交線はボールの回転軸(\vec{n})である。交線 \vec{n} 、 \vec{OP}_1 を通る平面の法線ベクトルを \vec{N}_1 、交線 \vec{n} 、 \vec{OP}_2 を通る平面の法線ベクトルを \vec{N}_2 とすると \vec{N}_1, \vec{N}_2 のなす角 ϕ は、

$$\phi = \cos^{-1} \frac{\vec{N}_1 \cdot \vec{N}_2}{|\vec{N}_1| |\vec{N}_2|} \dots \dots \dots (1)$$

カメラのコマ間の時間を $\Delta T [ms] = t_2 - t_1 =$ とすると、ボールの回転速度 ω は、

$$\omega = \frac{\phi \times 10^3}{2\pi \Delta T} \text{ rps} \dots \dots \dots (2)$$

となる。

2.3 試料 今回実験に用いた試料は、表1に示すような、市販されている構造の違う6種類の硬式テニス用ストリング Nylon 1~5 と Kevlar を用いた。OG-SHEEP 5800 PRO (材質はケブラーである) を除いて材質はすべてナイロンである。

3. 実験結果および考察

3.1 ストリングスの摩擦特性 ストリングスとテニスボールの摩擦特性を 2.1 節に提案した装置で測定した。図4~6はその測定の一例である。コンタクト圧力は 15.85 kPa で、摩擦子と力センサの間にあるスプリングのばね定数は 0.39 N/mm である。図4, 5 と図6のサンプルはそれぞれ Nylon 1, Nylon 2 と Nylon 3 であるが、各曲線とも動摩擦と静摩擦運動が繰り返されていることを示している。ファストトップの摩擦力が小さい値を示しているが、段段、大きくなって安定していく。これは、手で摩擦子を設置してい

Table 1 Details of samples

Sample name	Trade code	Yarn diameter(mm)	Structure
Nylon1	OG-SHEEP RECTANGL Z	1.30	Mono+Mono (Unevenness)
Nylon2	OG-SHEEP MICRO SUPER16L	1.25	Mono+Mono
Nylon3	OG-SHEEP RECTANGL16L	1.28	Mono+Mono
Nylon4	OG-SHEEP 3800MR	1.10	Mono+Mono (Carbon)
Nylon5	HY-O-SHEEP 2900VL	1.33	Mono+Mono (Vibless)
Kevlar	OG-SHEEP 5800PRO	1.10	Multi+Multi

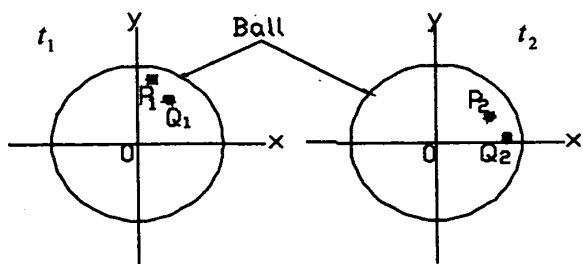


Fig. 3 Displacement of two points on the surface of a ball after impact

るための人為的な影響と思われる。以後セカンドトップの値を利用して、摩擦係数を算出する。ボールがストリングスと衝突した後のスピン具合はその材料の静摩擦と関係がある⁽¹²⁾ ので、静摩擦係数に注目した。

図7は3種類のストリングスとテニスボールの間の摩擦係数とコンタクト圧力の関係である。すべて5回の試験の平均値と標準偏差である。実際のテニスプレイでは、衝撃力の測定値は 63 kgf であると川副⁽¹⁾ に

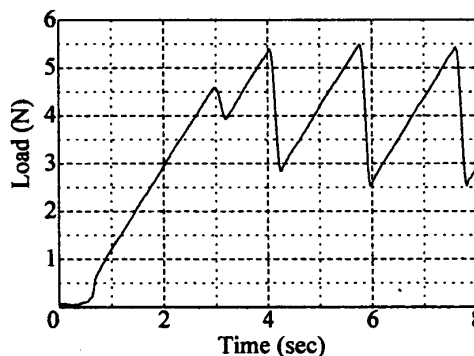


Fig. 4 Variation of frictional force between a ball and strings with time at contact pressure: 15.85 KPa (Nylon 1)

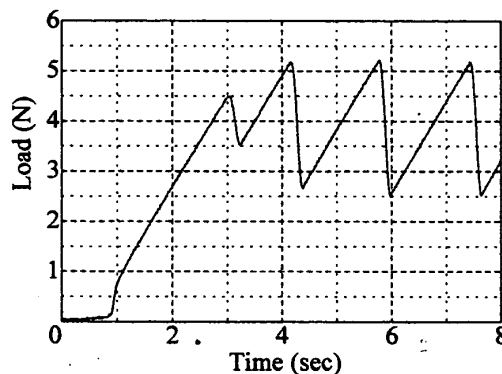


Fig. 5 Variation of frictional force between a ball and strings with time at contact pressure: 15.85 KPa (Nylon 2)

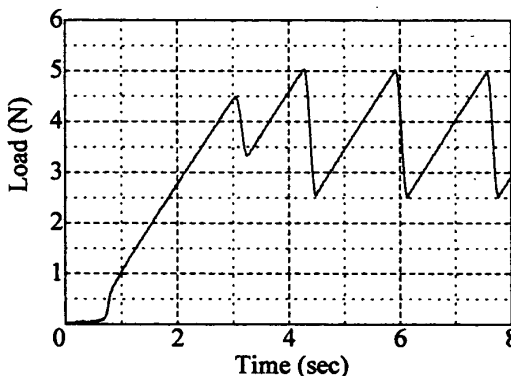


Fig. 6 Variation of frictional force between a ball and strings with time at contact pressure: 15.85 (Nylon 3)

より報告されているが、これより換算すると、ボールとストリングスの衝撃コンタクト圧力は本実験装置の20 kPaよりはるかに大きい。本実験装置ではこれ以上の法線力の増加が困難であるから、摩擦特性の参考にしかできない。

図7に示したように、3種題のストリングスともコンタクト圧力の増加に従って摩擦係数は減少していく。これは、一般の高分子材料とゴムの間の摩擦特性と一致している。また、コンタクト圧力の増加にかかわらず、サンプルの摩擦係数の大きさはNylon 1, Nylon 2, Nylon 3の順になっている。

3・2 ストリングスによるボールのスピンのかかり具合
テニスボールが一定な高さより自由落下し、ストリングス固定装置に張ってあるストリングス面の中央に衝突する。衝突後、ボールの回転を高速度カメラで撮影し、式(1)と(2)よりボールの回転数を計算する。

図8に、ボールがストリングス面の中央に衝突する速度と衝突後のボールの回転速度との関係の例を示した。横軸はボールの衝突する速度で、落下させる高さから求めたもので、ボールの回転速度は5回の測定値

の平均値と標準偏差である。サンプルはそれぞれNylon 1, Nylon 2とNylon 3である。同図からわかるように、衝突速度が大きくなると、ボールの回転速度もほぼ直線的に増加していく。

図9は速度比(衝突後におけるボールの回転速度と衝突速度の比)と衝突速度の関係である。図8の曲線の傾きでもあり、ストリングスによるスピンのかかり具合の指標である。同図の点線は最小二乗法で求めた直線であるが、Nylon 1, Nylon 2とNylon 3の各サンプルともに、ほぼ水平な直線になっていることがわかる。他のサンプルも同じ傾向を示した。仮に、衝突する際ボールとストリングスとの間に滑りがないとすると、速度比の計算値(テニスボールの半径は32 mmで、ストリングス固定装置の傾きは40°を用いて)は3.1971/mで、図の実線で示した。

これより、水平な直線よりえられた速度比をストリングスによるスピンのかかり具合とし、感性評価などとの比較に用いる。

3・3 摩擦特性、スピンのかかり具合と感性評価の関係 3・1節で求めたストリングスとテニスボール

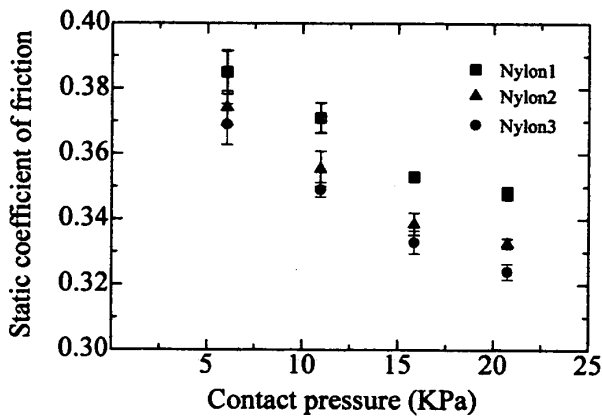


Fig. 7 Relationship between static coefficient of friction between a ball and strings and contact pressure

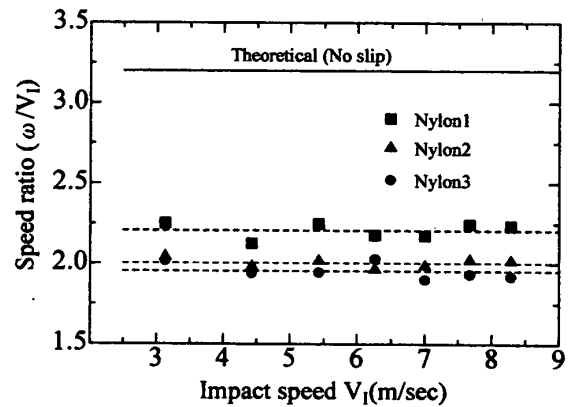


Fig. 9 Relationship between speed ratio ω/V_i and impact speed (Tension : 244.64 N)

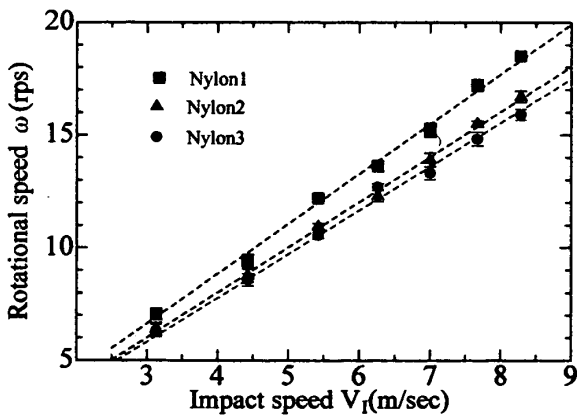


Fig. 8 Relationship between rotational speed and impact speed (Tension : 244.64 N)

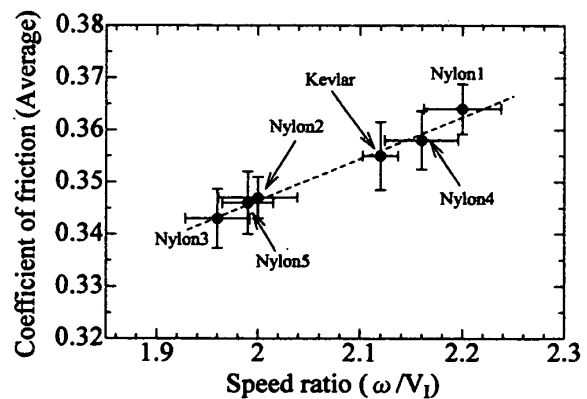


Fig. 10 Relationship between speed ratio ω/V_i and coefficient of friction (average)

の摩擦特性と3・2節でのストリングスによるスピンのかかり具合の関係を図10に示す。横軸は図9より求めた速度比で、縦軸は全コンタクト圧力の摩擦係数の平均である。図10の点線は最小二乗法により求めたものである。ストリングスとテニスボールの摩擦係数が大きくなると、スピンのかかり具合(速度比)は大きくなる。両者ではかなりよい直線的相関を示している。ストリングスの表面の摩擦特性、すなわち外層における糸の表面構造、ストリングスの表面加工などはボールのスピンのかかりやすさに大きく影響していることがわかった。また、ストリングスとテニスボールの摩擦特性の測定より、ストリングスによるスピン具合も予測できる。

ストリングスを製造しているメーカーではいろいろストリングスに対してプロ選手の感性評価を始め、さまざまなユーザの感性評価をまとめて、メーカー評価値とし、カタログ⁽¹¹⁾に載せている。ストリングスに対してスピンのかかり具合の評価値として“スピン”を採用している。

本研究で提案した摩擦特性の実験で求めた各圧力のストリングスとテニスボールの静摩擦係数の平均とメーカーが使われている“スピン”値との関係を図11に示した。横軸は“スピン”で、実質上は3段階しか使っていないので(3~5で評価している)、あまり細かい。静摩擦係数の平均値とメーカー評価値“スピン”との関係はほぼ比例している。この関係はある程度評価できるが、図10の線形度と比べてばらつきが大きい。これは本研究での摩擦測定装置の接触圧力範囲が実際にプレイする際の接触圧力より小さいためと、ス

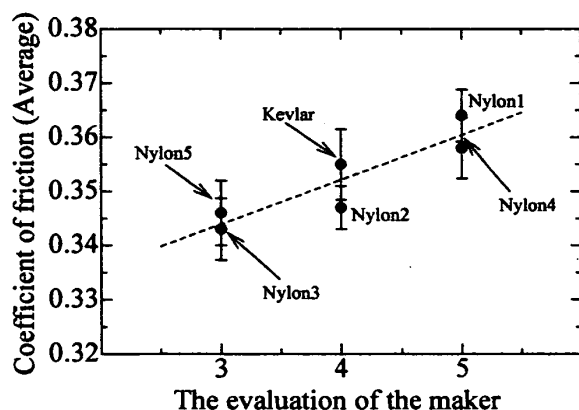


Fig. 11 Relationship between evaluation value of the maker and experimental value of coefficient of friction for the spin effect of strings

ピンを測定するシステムの制限より、衝突速度が実際にプレイする際の衝突速度と比べて小さいためと考えられる。高接触圧力と高速衝突する際ストリングスの軸方向における変形特性もスピンに影響することが予測されているから、これからの課題として、検討する。

4. まとめ

テニスにおけるストリングによるボールのスピンのかかり具合を検討するために、ストリングとボールとの摩擦特性を測定する装置を製作し、各種ストリングスについてボールとの摩擦特性を測定し、また、ボールに対するスピンのかかり具合を測定した。ボールのスピンの測定には高速カメラを用いた。摩擦特性とスピン特性の間の関連性を検討し次の結果をえた。

(1) 衝突後のボールの回転速度は、その衝突速度に左右され、衝突速度に対して直線的に増加する。そのこう配はストリングスの種類により異なる。

(2) ストリングスによるスピンのかかり具合はストリングスの表面摩擦特性とよい線形な関係がある。したがって、ストリングスの表面とボールとの摩擦特性より、スピン具合が予測できる。

(3) 本研究でのストリングスの表面摩擦特性とスピン具合の実験結果は、低速衝突の範囲で、メーカーが行っている人の感性による“スピン”の評価と一定な関連がある。

スピン測定装置の作製等で協力を受けた信州大学繊維学部の学部生山本真吾君と、測定方法等に関し、有益な助言をいただきました信州大学繊維学部の飯田一先生にお礼を申し上げる。

本研究は文部科学省科学研究費補助金(COE形成基礎研究費; 10 CE 2003)の補助を受けて行った。

文 献

- (1) 川副嘉彦, テニスジャーナル, 10-7 (1996), 132-237
- (2) 川副嘉彦, 機論, 59-558, C (1993), 521-528.
- (3) 川副嘉彦, 機論, 59-562, C (1993), 1678-1685.
- (4) 川副嘉彦・神田芳文, 機論, 59-563, C (1993), 2116-2123.
- (5) 川副嘉彦・神田芳文, 機論, 59-566, C (1993), 3108-3115.
- (6) 鮑力民・高寺政行・飯田一・小山恭史・篠原昭, 機論, 65-632, C (1999), 1319-1324.
- (7) 鮑力民・桜井正幸・小山恭史・中沢賢・篠原昭, 機論, 68-665, C (2002), 96-100.
- (8) 神田芳文, 機論, 64-625, C (1998), 3383-3390.
- (9) 神田芳文, 機論, 65-638, C (1999), 3890-3897.
- (10) 中川友末・関口泰久・十都善行, 機講論, No. 96-20 (1996-10), 27-30.
- (11) GOSEN CATALOG1999, GOSEN.
- (12) 森口繁一, 初等力学, (1959), 175-179, 培風館.